

# 聚硅酸铁去除焦化废水生化尾水有机物的效能研究

单文澜,袁可,陈虎,袁进,范晓军\*

(太原理工大学环境科学与工程学院,山西晋中030600)

**摘要:**采用共聚法制备聚硅酸铁(PSF)混凝剂,与助凝剂聚丙烯酰胺(PAM)搭配构成PSF+PAM混凝体系处理焦化废水生化尾水,并与PAC(聚合氯化铝)+PAM混凝体系进行有机物去除性能的对比分析。结果表明,混凝剂质量浓度为1 500~3 500 mg/L、PAM质量浓度为10 mg/L、初始pH=7.8的条件下,PSF+PAM混凝体系对有机物去除的性能更优;混凝剂质量浓度为3 000 mg/L时,PSF+PAM体系对废水COD、色度、UV<sub>254</sub>的去除率较PAC+PAM体系分别提高了8.53%、3.68%、11.17%。紫外-可见分光光谱分析结果表明,PSF+PAM体系对尾水中单环芳香族化合物、多环芳烃与含氮杂环化合物的去除效果优于PAC+PAM体系;三维荧光光谱表征结果表明,PSF+PAM体系对尾水中色氨酸等类芳香性蛋白质、类富里酸、类腐殖酸的去除效果优于PAC+PAM体系。PSF+PAM体系对焦化废水生化尾水有机物有较好的去除性能。

**关键词:**焦化废水生化尾水;混凝剂;聚硅酸铁;聚合氯化铝;有机物处理

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)05-0101-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.05.021

## Study on removal efficiency of polyferric silicate for organic matters in biochemical tail water of coking wastewater

SHAN Wen-lan, YUAN Ke, CHEN Hu, YUAN Jin, FAN Xiao-jun\*

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

**Abstract:** Polyferric silicate (PFS) coagulant prepared via copolymerization is combined with polyacrylamide (PAM) to form PSF+PAM coagulation system to treat bio-treated effluents of coking wastewater. The capability of removing organic matters by PSF+PAM is investigated in comparison with that by polyaluminum chloride (PAC)+PAM coagulation system, which is the most widely used system in factories. The results show that PFS+PAM coagulation system has a better performance in removing organic matters when the dosage of coagulant is in the range of 1,500–3,500 mg·L<sup>-1</sup>, the dosage of PAM is 10 mg·L<sup>-1</sup>, and the initial pH is 7.8. The removal rates of PSF+PAM coagulation system for COD, chroma and UV<sub>254</sub> are 8.53%, 3.68%, and 11.17% respectively higher than those of PAC system when the dosage of the coagulant is 3,000 mg·L<sup>-1</sup>. It is indicated from analysis by UV-Vis spectroscopy that PFS+PAM coagulation system performs better than PAC+PAM coagulation system in removing monocyclic aromatic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and nitrogen-containing heterocyclic compounds. In addition, three-dimensional fluorescence spectra characterization results demonstrate that PFS+PAM coagulation system also shows better removal performance for aromatic proteins such as tryptophan, fulvic acid and humic acid than PAC+PAM coagulation system. PSF+PAM coagulation system can deliver good removal performance to organic matters in biochemical tail water of coking wastewater.

**Key words:** bio-treated effluents of coking wastewater; coagulant; poly ferric silicate; polyaluminum chloride; organic matters treatment

焦化废水是典型的难生物降解、富含有毒有害污染物的工业废水,焦化废水处理常规采用“预处理+生化处理+后处理”三级处理工艺,其中生化处理作为焦化废水处理的主体工艺,由于微生物耐受范围及处理能力的局限性,生化处理尾水中仍存在部分未降解有机组分,其剩余COD主要归因于悬浮组分、胶体及溶解性有机质<sup>[1]</sup>,同时,含有的生色团

如—CHO—、—CH=CH—、—NO<sub>2</sub>及助色团—CH<sub>3</sub>、—NH<sub>2</sub>、—SH使生化尾水呈现棕黄色。Wei等<sup>[2]</sup>和张万辉等<sup>[3]</sup>通过树脂分离法与分光光度法分析表明,生化尾水中的TOC及色度主要由疏水酸性有机物(HOA)与疏水中性有机物(HON)组成,如多环芳烃类、各种甲基取代酚、吡啶及其衍生物等。焦化废水生化尾水中剩余有机物的存在使处理出水COD

收稿日期:2022-06-02;修回日期:2023-03-08

基金项目:山西省重点研发计划项目(201903D311004)

作者简介:单文澜(1998-),男,硕士研究生,研究方向为工业污水处理,648251867@qq.com;范晓军(1980-),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为环境生物学,通讯联系人,fanxiaojun@tyut.edu.cn。

及色度难以达到《炼焦化学工业污染物排放标准》(GB 16171—2012)要求,同时也给后续深度处理的膜系统带来堵塞及污染问题<sup>[4]</sup>。后处理一般采用混凝沉淀法,利用金属盐混凝剂水解、聚合产生的单核或多核羟基离子与高聚水解产物通过电中和、吸附架桥、卷扫网捕作用进一步去除生化尾水中悬浮物及部分疏水有机物,对多环芳烃、苯酚等具有一定的去除效果<sup>[5]</sup>。聚合氯化铝(PAC)作为传统铝基水解金属盐,因其具有较好的除浊性能及成熟的工艺得到广泛应用,但其水解产物密度较小,形成絮体结构较为松散,导致粘附、交联作用减弱,从而影响混凝效果,同时铝无机态化合物的生物毒性及可富集性也限制了其进一步发展<sup>[6]</sup>。近年来,付英等<sup>[7]</sup>以硫酸亚铁和硅酸钠为主要原料,首次通过共聚工艺制得聚硅酸铁混凝剂。于水利研究团队<sup>[8]</sup>通过研究聚硅酸铁(PSF)水解过程、微观品质及混凝性能,证明 PSF 具备独特的敞开式枝状结构,且其水解形态在宽 pH 范围下具备稳定性,使其具有更好的电中和/脱稳和吸附架桥能力。此外, Li 等<sup>[9]</sup>研究表明铁盐水解产物比铝盐水解产物能形成更多的氢和氧活性基团,对有机物的去除效果更为显著。尽管 PSF 混凝剂表现出良好的有机物去除潜力,但目前为止 PSF 混凝剂应用于焦化废水生化尾水有机污染物去除及其针对生化尾水有机物去除特性研究也待进一步论证。

综上所述,笔者采用复合共聚法制备 PSF 混凝剂,将其与 PAM 复配构建 PSF+PAM 混凝体系处理焦化废水生化尾水,并与传统 PAC+PAM 混凝体系进行有机物去除性能对照。通过对混凝反应前后废水 COD、色度及 UV<sub>254</sub> 指标进行对比,分析 PSF 与 PAC 混凝体系对生化尾水有机物的去除效果。同时,利用紫外-可见光吸收光谱(UV-Vis)、三维荧光光谱(3D-EEM)表征方法分析 PSF 与 PAC 体系处理焦化废水生化尾水有机物差异性,进一步论证 PSF 混凝剂应用于焦化废水生化尾水有机物去除的可行性。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

实验所用焦化废水生化尾水为山西某焦化厂生化处理二沉池出水,其浊度为 121.8 NTU, COD 为 299 mg/L, UV<sub>254</sub> 值为 2.47 cm<sup>-1</sup>, pH 为 7.8。硫酸铁、盐酸、九水硅酸钠、无水碳酸钠,国药集团山西有限公司生产;混凝剂 PAC 制备所需纯度 28%淡黄色

聚合氯化铝粉末及 PAM 制备所需分子质量 800 万白色聚丙烯酰胺固体粉末,乌市鑫邦环保科技有限公司生产。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 混凝剂的制备

**PSF 混凝剂制备:**将一定体积硅酸钠溶液缓慢滴加至体积分数 50%的盐酸中,调节 pH 至 3,活化 2 h 后制得无色透明的聚硅酸溶液(PS),加入一定量硫酸铁溶液,在搅拌条件下缓慢滴加无水碳酸钠溶液调节碱化度,从而制得红棕色 PSF 混凝剂;**PAC 混凝剂制备:**将质量分数 10%的 PAC 固体溶解于超纯水中,以 200 r/min 转速搅拌 5 min,静置 1 h 后使用;**PAM 助凝剂制备:**将质量分数 0.1% PAM 固体溶解于超纯水中,以 300 r/min 转速搅拌 40~50 min 后静置 2 h 使用。

#### 1.2.2 混凝实验

取 500 mL 焦化废水生化尾水加入程控六联混凝实验搅拌机(TA6-4 型,武汉恒岭科技有限公司生产)进行混凝反应,预搅拌 30 s 后,加入定量 PSF 在 150 r/min 转速条件下快速搅拌 5 min,再投加定量 PAM 以 50 r/min 慢速搅拌 90 s,搅拌结束后反应装置水样静置沉淀 30 min。取水样液面下 2 cm 处上清液测定出水 COD,经 0.45 μm 滤膜过滤后测定色度、UV<sub>254</sub>,分析不同混凝剂投加量条件下废水处理效果。同时,进一步对混凝前后水样进行紫外-可见光吸收光谱(UV-Vis)、三维荧光光谱(3D-EEM)表征分析,以对焦化废水生化尾水有机物去除特征进行分析。PAC+PAM 混凝体系为本实验对照组,按照以上步骤进行混凝实验及水质分析。

### 1.3 分析方法

**一般水质指标测定:**采用多参数水质测定仪(5B-3B 型,北京连华科技有限公司生产)通过快速消解分光光度法测定水样 COD;水样过 0.45 μm 有机滤膜,稀释后置于紫外-可见分光光度计(TU-1810 型,北京普析通用仪器有限责任公司)254 nm 处测定 UV<sub>254</sub> 值;色度用 CN 表示,相关计算式为<sup>[10]</sup>:

$$CN = (A_{436}^2 + A_{525}^2 + A_{620}^2) / (A_{436} + A_{525} + A_{620}) \quad (1)$$

其中: A<sub>436</sub>、A<sub>525</sub>、A<sub>620</sub> 分别为吸光度为 436、525、620 nm 波长下的吸光度。

**紫外-可见光谱(UV-Vis)表征分析:**将焦化废水生化尾水过膜稀释后调节 pH 至 7.0,利用 TU-1810 紫外分光光度计进行全波段扫描,波长范围为 200~600 nm,以超纯水为空白<sup>[11]</sup>。

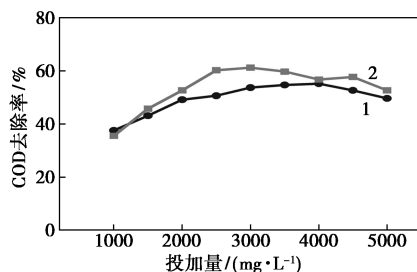
**三维荧光光谱表征分析:**通过荧光分光光度

计(RF-6000型,日本岛津公司生产)测定混凝处理前后水样。水样过膜稀释后置于10 mm石英比色皿中进行三维荧光光谱分析。激发波长( $E_x$ )为200~450 nm,数据间隔为2 nm,发射波长( $E_m$ )为250~550 nm,数据间隔为5 nm,扫描速度为12 000 nm/min<sup>[12]</sup>。

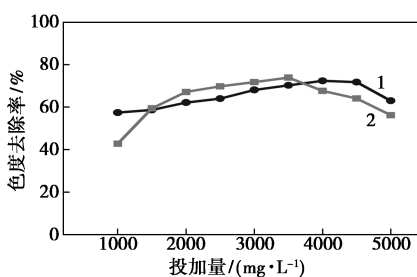
## 2 结果与讨论

### 2.1 2种混凝剂去除生化尾水COD及色度效果评价

在初始pH为7.8、PAM投加质量浓度为10 mg/L的条件下,PAC与PSF投加质量浓度对焦化废水生化尾水COD、色度去除效果的影响如图1所示。



(a) 对COD的影响



(b) 对色度去除率的影响

1—PAC+PAM; 2—PSF+PAM

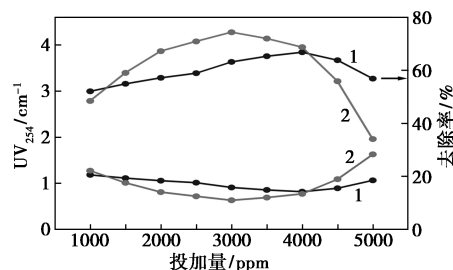
图1 PAC与PSF体系对焦化废水生化尾水色度及COD混凝去除效果

在2组混凝实验中,焦化废水生化尾水COD、色度的去除率均随着混凝剂投加质量浓度的增加表现出先上升后下降趋势。从图1(a)与图1(b)中可以看出,在混凝剂投加量1 500~3 500 mg/L范围内,PSF+PAM混凝体系对COD、色度的去除性能优势显著。李暮等<sup>[13]</sup>通过研究表明,铁盐混凝出水pH降幅高于铝盐,随着pH下降,铁盐水解反应受阻,故PSF混凝产生更多带正电单核及多核羟基络合离子如 $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{4+}$ 、 $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{5+}$ 、 $\text{Fe}_4\text{O}(\text{OH})_4^{6+}$ 等,能更好发挥电中和吸附作用去除生化尾水中悬浮物及HOA、HON等组分。同时PSF中的聚硅酸可起

到骨架构建作用,增大混凝剂分子质量,使其具有更好的网捕卷扫能力。此外,当混凝剂投加质量浓度低于1 500 mg/L,PSF对色度的去除效果弱于PAC,这是由于铝盐[以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 计]水解产物比表面积为200~400  $\text{m}^2/\text{g}$ ,略高于铁盐[以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 计]水解产物比表面积160~230  $\text{m}^2/\text{g}$ ,使PAC有更多吸附位点去除生化尾水色度基团<sup>[14]</sup>。当投加质量高于3 500 mg/L时,PSF和PAC对COD、色度的去除均变弱,归因于过量正电荷使胶粒产生相互排斥现象,导致脱稳的胶体又重新稳定,混凝效果变差。

### 2.2 2种混凝剂处理生化尾水进出水 $\text{UV}_{254}$ 变化

$\text{UV}_{254}$ 表示水体中含 $\text{C}=\text{C}$ 、 $\text{C}=\text{O}$ 双键结构芳香族化合物及腐殖质类大分子有机物含量,是衡量水体有机物的一项重要参数。PAC与PSF体系对焦化废水生化尾水 $\text{UV}_{254}$ 去除效果如图2所示。从图2中可以看出,当混凝剂投加量在1 500~4 000 mg/L范围内,PSF+PAM混凝体系处理出水 $\text{UV}_{254}$ 值均低于PAC+PAM混凝体系,表明PSF对含共轭双键结构芳香族化合物去除有一定优势,归因于PSF水解产生更多氢和氧活性基团,其电中和吸附水中带负电荷胶体粒子的能力较PAC显著增强。付英等<sup>[15]</sup>研究表明,PSF具有一定的氧化性,可以改变有机物表面性能,使其由亲水性向憎水性转化,从而提高被吸附效率。随着混凝剂投加质量浓度的进一步增加并超过4 000 mg/L时,出水 $\text{UV}_{254}$ 均呈现升高趋势,归因于过量混凝剂产生大量水解产物将废水中的胶体微粒包围,胶体颗粒表面饱和发生电荷异号,从而相互排斥出现再稳现象。此外,过量PSF可迅速络合生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ 等产物消耗水中 $\text{OH}^-$ ,导致其絮体形态不稳定,吸附架桥能力减弱,处理性能弱于PAC。



1—PSF+PAM的 $\text{UV}_{254}$ ; 2—PAC+PAM的 $\text{UV}_{254}$ ;  
3—PSF+PAM的去除率; 4—PAC+PAM的去除率

图2 PAC与PSF体系对焦化废水生化尾水 $\text{UV}_{254}$ 去除效果

通过对图1、图2的分析表明,混凝剂投加质量浓度为3 000 mg/L时,PSF+PAM体系有机物去除

性能优势最为显著,其对废水 COD、色度、UV<sub>254</sub> 去除率比 PAC + PAM 体系分别提高 8.53%、3.68%、11.17%。对该条件混凝处理前后水样进行紫外-可见光谱表征与三维荧光光谱表征分析,进一步探究 2 种混凝剂对焦化废水生化尾水有机物去除特征及差异。

### 2.3 焦化废水生化尾水中有色溶解性有机质去除分析

含有  $\pi$  键及孤对电子等不饱和结构基团的有色溶解性有机质(CDOM)可吸收紫外和可见光辐射并产生不同电子能级跃迁从而产生 UV-Vis 光谱,将焦化废水生化尾水混凝前后水样进行 UV-Vis 吸收光谱扫描,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,200~250 nm 处的吸收峰由单环芳香化合物 E 吸收带形成,300~370 nm 处出现较小的吸收峰由多环芳烃(PAHs)及含氮杂环化合物的 B 吸收带形成,表明焦化废水生化尾水中存在部分单环芳香化合物、多环芳烃(PAHs)及含氮杂环化合物。通过对比焦化废水生化尾水混凝处理前后全波长吸光度可知,经 PSF 体系处理的废水在 200~250 nm 波长范围内吸光度较 PAC 体系降低且吸收峰蓝移,表明 PSF 体系对单环芳香族化合物有相对较好的去除效果,但混凝反应整体对单环芳香族化合物去除能力有限。300~370 nm 波长范围内,PSF 体系处理的废水吸光值降低幅度明显,表明混凝处理能有效去除生化尾水多环芳烃和杂环类物质,且 PSF 去除效果优于 PAC,归因于 PSF 水解产物密度更大,形成絮体结构较 PAC 更为密实紧凑,表现出更显著的粘附交联作用及更强的有色溶解性有机质去除能力。在波长大于 450 nm 的可见光区,经混凝处理废水吸光度均趋近于零,表明 2 种混凝剂都可有效去除废水中悬浮物组分。

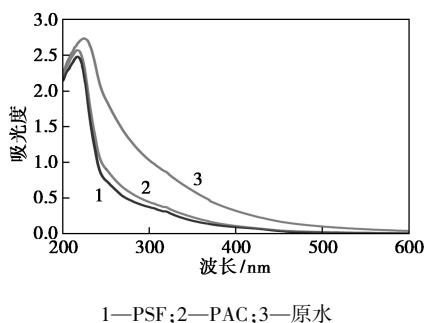


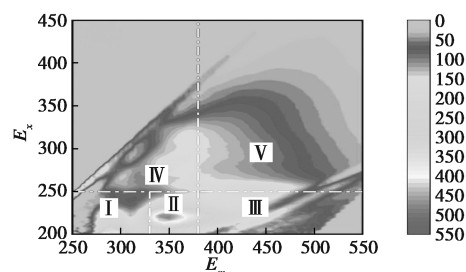
图 3 焦化废水生化尾水混凝前后紫外-可见吸收光谱图

### 2.4 焦化废水生化尾水中荧光溶解性有机质去除分析

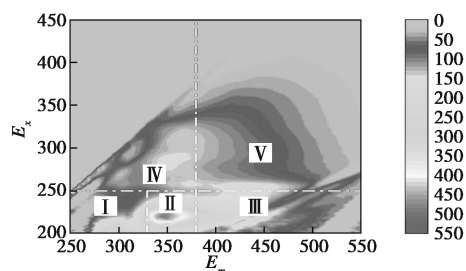
荧光溶解性有机质(FDOM)含有共轭体系强吸收基团,其吸光后具有荧光响应,通过同时改变激发光波长( $E_m$ )与发射光波长( $E_x$ )获得三维荧光光谱图,可揭示废水中有机物组成情况及有机物结构变化。对焦化废水生化尾水混凝处理前后水样进行三维荧光扫描,结果如表 1、图 4 所示。

表 1 废水样品各区域荧光峰强度

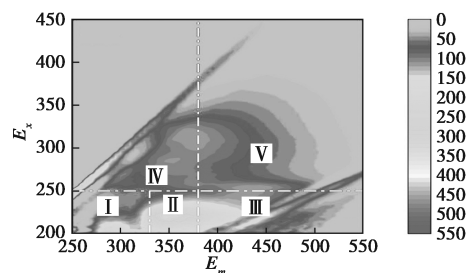
水样/强度	I 区	II 区	III 区	IV 区	V 区
生化尾水	438	485	347	193	202
PAC 混凝处理出水	380	504	337	163	173
PSF 混凝处理出水	334	367	269	190	134



(a) 焦化废水生化尾水



(b) PAC 体系混凝处理出水



(c) PSF 体系混凝处理出水

图 4 焦化废水生化尾水混凝前后三维荧光光谱图

将焦化废水生化尾水荧光光谱图划分为 5 个区域,并找到具有明显标识的荧光峰 T<sub>2</sub> 峰( $\lambda_{e_x}/\lambda_{e_m} = 220/350$  nm),代表芳香蛋白氨基酸。由表 1、图 4 可知,PAC 体系对废水 I、II 区类芳香性蛋白质处理效果不明显,而 PSF 体系混凝处理出水 I、II 区荧光强度明显减弱且出现蓝移现象,表明 PSF 对色

氨酸等溶解性蛋白质具有更好的去除性能。同时,混凝处理出水Ⅲ区和V区荧光峰强度均出现下降,表明混凝反应对焦化废水生化尾水中类富里酸及类腐殖酸类物质有一定去除效果,类腐殖酸区域代表有机物为含—COOH、—OH官能团多环类有机物菲、蒽、芘等<sup>[16]</sup>。从表1中可以看出,PSF对该类多环类有机物去除效果优于PAC,从而进一步验证了2.3部分的相关结论。

### 3 结论

在1 500~3 500 mg/L混凝剂投加范围内,PSF+PAM混凝体系较PAC+PAM体系表现出更强的COD、色度、UV<sub>254</sub>去除能力,PSF体系能更有效地去除生化尾水中疏水性有机物(HOA、HON)及含C=C、C=O等不饱和结构芳香族化合物。

UV-Vis表征结果表明,PSF体系对焦化废水生化尾水单环芳香族化合物、多环芳烃和含氮杂环化合物去除能力均强于PAC体系;3D-EEM表征结果表明,PSF体系混凝处理能有效去除生化尾水中类芳香性蛋白质、类富里酸及类腐殖酸物质,去除效果优于PAC体系。

### 参考文献

- [1] 曹臣,韦朝海,杨清玉,等.废水处理生物出水中COD构成的解析——以焦化废水为例[J].环境化学,2012,31(10):1494-1501.
- [2] Wei C, Wu H, Kong Q, et al. Residual chemical oxygen demand (COD) fractionation in bio-treated coking wastewater integrating solution property characterization [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 324-333.
- [3] 张万辉,韦朝海,晏波,等.焦化废水中溶解性有机物组分的特征分析[J].环境化学,2012,31(5):702-707.
- [4] 高德堂,张翠兰.焦化废水浓盐水的浓缩减量及近零排放工艺[J].给水排水,2021,57(11):92-97.
- [5] 陈雷,朱四琛,徐炎华,等.混凝法联合Fenton或O<sub>3</sub>氧化法深度处理焦化废水生化尾水[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(1):62-66.
- [6] 王同成.PAC、PFS混凝剂去除微污染水体中PCBs效果研究[J].工业用水与废水,2019,50(1):34-39.
- [7] 付英,于水利,杨园晶,等.聚硅酸铁(PSF)混凝剂硅铁反应过程研究[J].环境科学,2007,(3):569-577.
- [8] 付英,于水利.聚硅酸铁水解规律及混凝机理的探讨[J].环境科学,2007,(1):113-119.
- [9] Li S, Liu M, Meng F, et al. Removal of F<sup>-</sup> and organic matter from coking wastewater by coupling dosing FeCl<sub>3</sub> and AlCl<sub>3</sub> [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 110: 2-11.
- [10] 陈炜鸣,张爱平,李民,等.O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>降解垃圾渗滤液浓缩液的氧化特性及光谱解析[J].中国环境科学,2017,37:2160-2172.
- [11] Zhou X, Hou Z L, Song J J, et al. Spectrum evolution of dissolved aromatic organic matters (DAOMs) during electro-peroxi-coagulation pretreatment of coking wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 235: 116125.
- [12] Li J F, Li J G, Liu X Y, et al. Effect of silicon content on preparation and coagulation performance of poly-silicic-metal coagulants derived from coal gangue for coking wastewater treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 202: 149-156.
- [13] 李暮,钱飞跃,李欣珏,等.铁盐和铝盐混凝对印染废水生化出水中溶解性有机污染物的去除特性[J].环境工程学报,2012,6(11):3833-3838.
- [14] 周玲玲,张永吉,孙丽华,等.铁盐和铝盐混凝对水中天然有机物的去除特性研究[J].环境科学,2008,(5):1187-1191.
- [15] 付英,于水利.聚硅酸铁去除溶解性有机物的机理[J].吉林大学学报(工学版),2007,(3):709-714.
- [16] Du Z P, Gong Z P, Qi W H, et al. Coagulation performance and floc characteristics of poly-ferric-titanium-silicate-chloride in coking wastewater treatment [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 642: 128413. ■
- [17] 红工艺[J].工程科学学报,2020,42(10):1325-1334.
- [18] 冯海军,王冠宁,王立宝,等.酸洗废液及污泥制备磁性氧化铁颜料的工艺[J].化工进展,2019,38(2):1129-1133.
- [19] 元强,黄艳玲,黄庭杰,等.激发剂对碱矿渣-粉煤灰浆体流变性能的影响(英文)[J].Journal of Central South University, 2022, 29(1):282-295.
- [20] Alaa M Rashad.高温条件下微粒径偏高岭土改性高掺量粉煤灰粉体的研究(英文)[J].Journal of Central South University, 2020,27(1):231-241.
- [21] Katsunori Tamura, Tatsuki Kunoh, Noriyuki Nagaoka, et al. High-quality inorganic red pigment prepared by aluminum deposition on biogenous iron oxide sheaths [J]. ACS Applied Bio Materials, 2020, 3(9):5699-5707. ■
- [22] Bottaini C, Vila A R, Schiavon N, et al. New insights on late bronze age Cu-metallurgy from coles de samuel hoard (central portugal): A combined multi-analytical approach [J]. Journal of Archaeological Science Reports, 2016, 7: 344-357.
- [23] Jiang Liangpeng, Fu Jingjing, He Chunxia. Reliability analysis of wood-plastic composites in simulated seawater conditions: Effect of iron oxide pigments [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101318.
- [24] Liu Xiao, Gao Peng, Yuan Shuai, et al. Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting [J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106553.
- [25] 杨源,邓志敢,魏昶,等.利用湿法炼锌赤铁矿法沉铁渣制备铁

(上接第100页)